

Nueva técnica de modulación de excitación para sistemas EER

David Tena-Ramos⁽¹⁾, Francisco Javier Ortega-Gonzalez⁽¹⁾, Moises Patiño-Gomez⁽¹⁾,
Jose Manuel Pardo Martin⁽¹⁾

david.tena@upm.es, fjortega@diac.upm.es, mopatigo@gmail.com, jmpardo@diac.upm.es

⁽¹⁾ Grupo de Ingeniería de Radio, Universidad Politécnica de Madrid,
Carretera de Valencia Km. 7, 28031, Madrid, España.

Abstract- This paper shows a novel drive modulation technique applied to a high power, high efficiency, linear Envelope Elimination and Restoration (EER) amplifier for L-Band. It comprises a mixed-mode suboptimum Class-E / Class-A wideband RF amplifier based on a dual GaN HEMT for RF carrier amplification and a high efficiency, high switching frequency, multi-phase, buck power converter based on Silicon LDMOS transistors to work as a modulator (or envelope amplifier). The linearity and power gain for this EER amplifier is improved by means of a new digital drive modulation technique and digital predistortion (DPD) to achieve linearity performances equivalent or better than Class-AB amplifiers of similar output power level and frequency band but exhibiting much higher efficiency. This EER amplifier provides 120W peak output power at the L-band without any adjustment. In a two tone test, measured third and fifth-order intermodulation products were -45 dBc and -49 dBc, respectively, reaching 67.5 % maximum PAE.

I. INTRODUCCIÓN

Uno de los retos perseguidos en todo sistema de comunicación inalámbrico es reducir el consumo de las fuentes de alimentación de los sistemas. El empleo de amplificadores de potencia de alto rendimiento en modo de conmutación puede ayudar a cumplir este objetivo. Además, permiten mejorar la gestión del calor generado lo que puede ayudar a prescindir o reducir equipos de refrigeración y, de esta manera, reducir el tamaño de los transmisores de radiofrecuencia [1], [2]. Sin embargo, su naturaleza no lineal dificulta su incorporación en los sistemas de comunicaciones inalámbricas modernos.

Por otro lado, el uso de modulaciones complejas en las comunicaciones actuales, con el fin de aprovechar al máximo el espectro de radiofrecuencia y aumentar la tasa binaria de datos, incrementa la complejidad en el diseño de los sistemas ya que dichas señales presentan envolventes no constantes que requieren de sistemas muy lineales para su amplificación.

Para salvar estas limitaciones de los amplificadores de potencia en modo de conmutación se han propuesto diversas técnicas de linealización capaces de mantener el comportamiento en alto rendimiento. Entre ellas, la técnica de Eliminación y Restauración de Envolvente (*Envelope Elimination and Restoration*, EER), también conocida como la técnica de Kahn [3], es una candidata excelente para sistemas que requieren un rendimiento en potencia alto en combinación con unas características de linealidad moderada [4].

El funcionamiento de la técnica original EER es ya muy conocido. La señal de RF de entrada se divide en sus componentes de envolvente y fase a través de un detector de envolvente y un limitador, respectivamente. Posteriormente, ambas componentes son amplificadas por amplificadores de alto rendimiento (normalmente un convertidor DC-DC para la componente de envolvente y un amplificador de potencia de alto rendimiento en modo de conmutación para la componente de fase). La envolvente amplificada se encarga de alimentar, o modular, al amplificador de potencia de alto rendimiento, obteniendo a la salida idealmente una copia exacta de la entrada pero amplificada.

Sin embargo, esta técnica también tiene algunos inconvenientes, por ejemplo, en ausencia de alimentación de envolvente o a niveles muy bajos, se genera un efecto llamado “*feed-through*” a la salida del sistema EER debido al nivel de excitación fija presente en el amplificador de RF, lo que provoca distorsión en la señal de salida. Otras fuentes de distorsión importantes se pueden deber al desalineamiento en tiempo entre las componentes de fase y envolvente y a las componentes de frecuencia no deseadas procedentes del amplificador de envolvente, etc.

Por esta razón, la combinación de la técnica EER con otras técnicas como pueden ser la predistorsión digital (*Digital Predistortion*, DPD) o la modulación de señal de excitación (*Drive modulation*, DM) pueden ayudar a corregir estos elementos de distorsión con el fin de que la linealidad del sistema cumpla con las especificaciones requeridas por la aplicación del sistema.

En este trabajo se presenta un nuevo sistema EER lineal de alto rendimiento para banda L basado en un amplificador de potencia que trabaja en modo mixto (clase E subóptimo / clase A) modulado por un amplificador de envolvente basado en un convertidor reductor (*buck*) multifase y linealizado por medio de la combinación de predistorsión digital y una nueva técnica de modulación de puerta basada en técnicas de procesado digital de la señal.

El objetivo principal de este trabajo es realizar la comparación entre el funcionamiento de un sistema EER convencional y el propuesto en este trabajo.

Gracias a la combinación de estas técnicas, el sistema es capaz de alcanzar valores de linealidad equivalentes o mejores que los convencionales amplificadores clase AB para la misma banda de frecuencia y niveles de potencia de salida pero proporcionando un rendimiento de potencia añadida (*Power Added Efficiency*, PAE) mucho mayor [5].

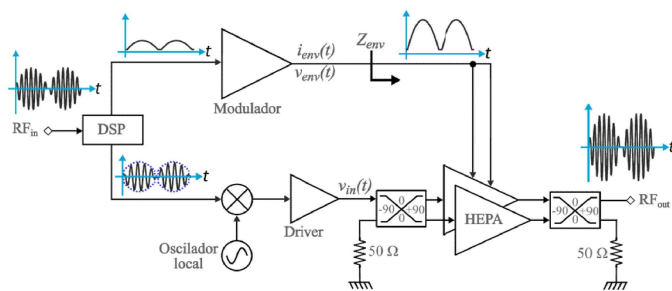


Fig. 1. Diagrama de bloques del sistema EER

II. SISTEMA EER

El diagrama de bloques simplificado del amplificador EER propuesto en este trabajo se muestra en la Fig. 1. Está compuesto por dos bloques principales: por una lado una etapa electrónica y por otro una etapa de procesamiento digital de la señal (Digital Signal Processing, DSP). La etapa electrónica se compone de todos los elementos hardware del sistema, como son el amplificador de RF, el amplificador de envolvente y todos los instrumentos de laboratorio necesarios para la generación, visualización y captura de las señales que intervienen en el sistema (generador vectorial de señal, generador de funciones arbitrarias, etc.). El bloque de procesamiento digital consta de todos los algoritmos y funciones de control necesarias para generar y alinear en tiempo las señales involucradas en el sistema EER, además de calcular e implementar las curvas de predistorsión digital y la modulación de puerta con el fin de mejorar la linealidad del sistema. Además, esta etapa también realiza el control automático de todos los equipos de laboratorio empleados. A continuación se realizará una breve descripción de los dos elementos principales de la etapa electrónica:

A. Amplificador de RF en modo mixto

La etapa de RF empleada para amplificar la portadora modulada en fase del amplificador EER se basa en un amplificador de potencia de banda ancha y alto rendimiento. Es un amplificador clase E subóptimo balanceado [6] con la particularidad de ser polarizado con una corriente de polarización de drenador, I_{DQ} , mucho más alta de lo habitual con el objetivo de mantener al amplificador en clase A cuando la potencia de excitación de entrada presenta niveles bajos.

El amplificador emplea un transistor GaN HEMT encapsulado de “Cree, Inc” en topología balanceada para entregar hasta 180W de potencia de salida de pico (en modo pulsado) desde los 900MHz a los 1500MHz a 28V de tensión de alimentación. Es capaz de conseguir un rendimiento de drenador máximo de un 85% y una PAE máxima del 81%.

Cuando la potencia de excitación de entrada, P_{in} , es alta, dicha excitación es superior a la polarización de DC y el amplificador trabaja en modo de conmutación (clase E subóptimo) exhibiendo el funcionamiento de alto rendimiento mostrado en [6]. Para un nivel bajo de P_{in} , la polarización de DC domina sobre la excitación y, fijando la tensión de alimentación a un cierto nivel constante, el amplificador trabaja en modo lineal (clase A) proporcionando menor rendimiento pero mejorando la ganancia de potencia (G_P) y la linealidad. En ambos modos, el amplificador presenta una impedancia constante en su puerto de alimentación de potencia de entrada, Z_{env} , requisito

clave para el correcto funcionamiento del modulador o amplificador de envolvente.

B. Modulador

El modulador, también conocido como amplificador de envolvente, está basado en un convertidor reductor de DC-DC de dos fases de alta velocidad de conmutación [7]. Está fabricado con transistores LDMOS de RF de silicio controlado por una *driver* aislado de alta velocidad.

Entre otras ventajas, la topología multifase favorece la eliminación de la frecuencia de conmutación del convertidor; el resto de las componentes no deseadas a la salida del modulador son atenuadas mediante la incorporación de un filtro paso bajo de cuarto orden de Legendre-Papoulis diseñado específicamente para permitir el mayor ancho de banda de la señal procedente del modulador mientras atenúa simultáneamente las componentes no deseadas en su banda atenuada [7].

El modulador puede trabajar con frecuencias de conmutación, f_{sw} , de hasta 10 MHz entregando una potencia máxima de salida de 150W con un rendimiento medio típico de hasta el 88%, siendo capaz de trabajar con señales cuyo ancho de banda es de 3.125 MHz. Trabaja en “lazo-abierto” lo que requiere una impedancia de carga relativamente constante para trabajar correctamente; en estas condiciones puede proporcionar tensiones de envolvente a su salida comprendidas aproximadamente entre el 5% y el 95% de su tensión de alimentación, V_{DC} .

III. FUNCIONAMIENTO EN MODO MIXTO COMBINADO CON MODULACIÓN DE PUERTA

La técnica de modulación de excitación en amplificadores EER fue inicialmente propuesta por Raab [8]. Básicamente consiste en usar la envolvente de la señal amplificada por el sistema EER para modular la amplitud de la señal de excitación de entrada con el fin de mejorar la G_p y PAE de la etapa de amplificación de RF. La técnica de modulación de excitación original, mostrada en la Fig. 2, requiere siempre de un nivel mínimo de excitación para atacar al amplificador de RF, manteniéndolo siempre en modo de conmutación incluso cuando la envolvente de la señal amplificada es muy baja o nula (por ejemplo, en los instantes que la señal a amplificar tenga cruces por cero).

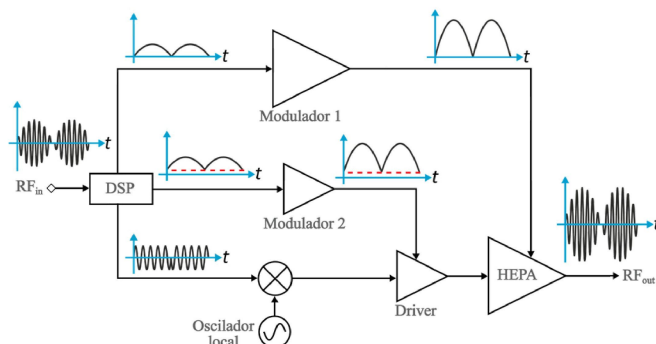


Fig. 2. Modulaci3n de puerta propuesta por Raab

El sistema propuesto en este trabajo no requiere un nivel mínimo de excitación lo que permite amplificar señales que presenten instantes donde se produzcan cortes por cero con baja distorsión. La técnica de modulación de excitación propuesta, además de mejorar la linealidad del sistema tanto

o más que técnicas anteriores, mejora el funcionamiento del sistema para niveles bajos de excitación de entrada aumentando el rango dinámico del amplificador al reducir el *feed-through* del sistema.

Es importante recalcar que normalmente la excitación de los sistemas EER no puede ser cero debido a las limitaciones técnicas de los moduladores. La impedancia presentada en el puerto de alimentación del amplificador de RF (Z_{env}) se incrementa en los instantes de cruces por cero de la señal de RF provocando una subida y una bajada brusca en la tensión de salida del modulador, v_{env} .

El sistema EER presentado en este trabajo acepta condiciones de excitación cero gracias al funcionamiento en modo mixto del amplificador de RF. Como ya se ha comentado anteriormente, dicho amplificador trabaja en modo de conmutación (clase E subóptimo) a niveles altos de excitación de entrada y en modo lineal (clase A) a niveles bajos de excitación, proporcionando además una Z_{env} constante independientemente del nivel de excitación.

Cuando el nivel de la excitación de entrada es bajo y la envolvente de la señal amplificada se encuentra por debajo de un determinado valor de tensión, v_{th} (elegido de manera experimental), la tensión a la salida del modulador, v_{env} , se hace constante forzando al amplificador a trabajar en clase A. Esto permite que el amplificador de RF proporcione una Z_{env} relativamente constante en su puerto de DC independientemente del nivel de excitación. Esta Z_{env} constante es crucial para el correcto funcionamiento del modulador. Por ello, cualquier desvanecimiento repentino del nivel de excitación no provocará que v_{env} aumente en los instantes cuando debería ser baja o cero, lo que daría como resultado una distorsión adicional de la señal amplificada.

La técnica de modulación de excitación descrita se implementa por medio de técnicas de procesamiento digital de la señal que son menos costosas y más flexibles que el uso de circuitos electrónicos, como ha sido realizado en otros trabajos previos que implementan otras formas de técnica de modulación de excitación [8].

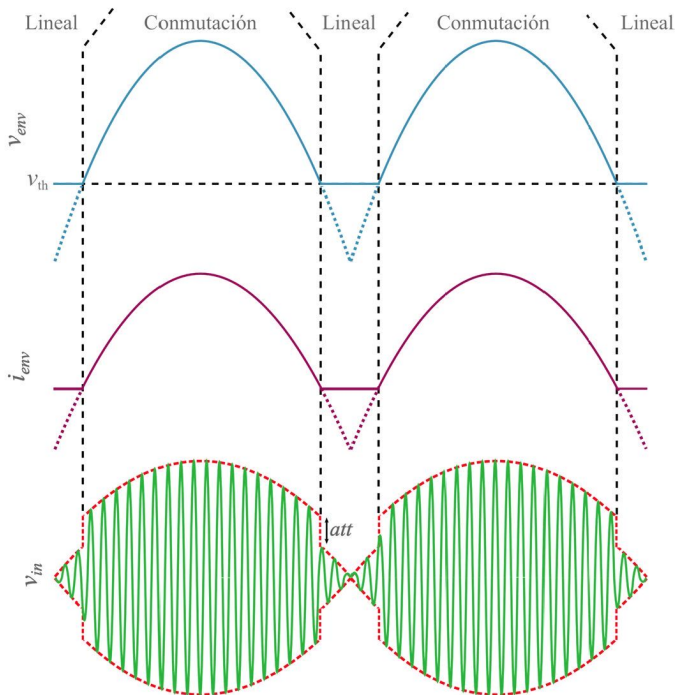


Fig. 3. Formas de onda ideales para en una prueba de dos tonos

La Fig. 3 muestra las formas de onda ideales (línea continua) de tensión de salida del amplificador de envolvente (v_{env}), corriente de salida del amplificador de envolvente (i_{env}) y tensión de excitación de entrada al amplificador de RF (v_{in}) para una señal de prueba de dos tonos aplicada al sistema EER. Se puede observar que tanto v_{env} como i_{env} siguen la envolvente de la señal amplificada mientras se encuentran por encima de un cierto valor v_{th} pero son constantes (planas) cuando la envolvente se encuentra por debajo de v_{th} (lo que corresponde a niveles bajos de excitación), trabajando en clase A. La tercera figura en la Fig. 3 muestra la forma ideal de v_{in} para la misma prueba de dos tonos. Como puede verse, la excitación de entrada se atenúa dentro de la región de funcionamiento debido a la diferencia entre la G_P mostrada por el amplificador en Clase A y la G_P en el modo de conmutación (Clase E subóptima).

Por último y con el objetivo de alcanzar niveles de linealidad equivalentes a los amplificadores clase AB para las mismas características de potencias y frecuencia, este amplificador necesita la aplicación de técnicas de linealización complementarias como la predistorsión digital. La conversión V_{DD} -PM presenta su mayor efecto en la región $v_{env} > v_{th}$ (donde el amplificador trabaja en modo de conmutación). En la región $v_{env} < v_{th}$ donde el amplificador trabaja en su zona lineal, tanto AM-AM como AM-PM necesitan ser corregidas [9], [10].

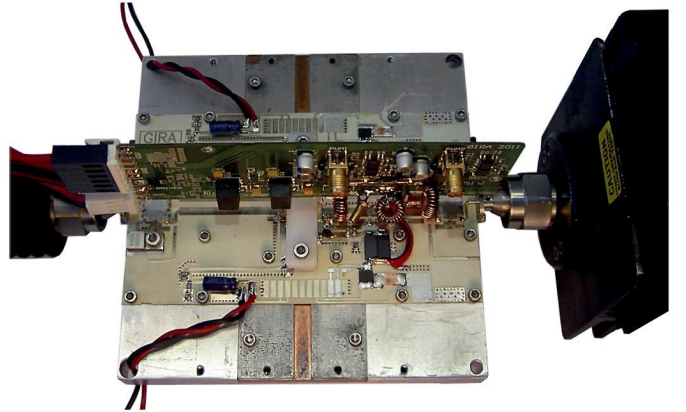


Fig. 4. Fotografía del prototipo EER

IV. PROTOTIPO

La Figura 4 muestra una fotografía del prototipo del amplificador que ha sido construido en dos placas de circuito impreso: el amplificador de RF fue construido sobre el sustrato de bajas pérdidas RO4350B de Rogers Corporation de altura 0.508 mm; el amplificador de envolvente fue construido sobre un sustrato de FR4 de 0.8 mm de altura. Ambos circuitos fueron integrados reduciendo al máximo los parásitos de interconexión. Los transistores del amplificador de envolvente utilizan la propia placa de circuito impreso para disipar el calor, mientras que el amplificador de RF solo requiere de un pequeño disipador de aluminio para un funcionamiento seguro.

El sistema EER fue probado por medio de la prueba de los dos tonos. Las componentes polares necesarias para excitar al amplificador de RF y al modulador durante las pruebas fueron generadas por dos generadores arbitrarios de señal y un generador vectorial de RF fue empleado como *up-converter*. También se utilizaron un analizador de señal, un analizador de espectros y un osciloscopio digital para

probar la señal de RF amplificada y demodularla obteniendo los parámetros necesarios para hallar predistorsión digital a aplicar.

El amplificador se probó mediante la inyección de dos tonos funcionando en condiciones EER normales (el amplificador de RF trabaja en modo conmutación durante todo su ciclo de trabajo y no se aplica modulación de excitación) y aplicando la técnica de modulación de excitación descrita en este trabajo. En ambos casos, el amplificador fue linealizado por medio de predistorsión digital.

Los resultados obtenidos por el sistema EER en cada una de las dos condiciones anteriores para una separación entre tonos de 100 kHz a una frecuencia de portadora de 1200 MHz y alimentado a 28 voltios fueron los siguientes: para una misma potencia de salida en ambos casos (P_{out} es aproximadamente 61W) se obtuvo un rendimiento de drenador del 75% y del 70.5% para el sistema EER convencional y el propuesto en este trabajo, respectivamente, mientras que la PAE solo experimentó una ligera caída del 2% en el sistema EER propuesto (PAE = 67.5%) comparado con el método convencional (PAE = 69.5%). Estas pequeñas caídas en el rendimiento del amplificador son debidas a la pequeña región en la que el amplificador trabaja en modo lineal con un pobre rendimiento (clase A). La aplicación de la técnica de modulación de excitación reduce la potencia de excitación necesaria lo que hace que la ganancia de potencia del amplificador G_P se incremente en 2.5 dB (lo que a su vez mejora su PAE), obteniéndose una G_P de 13.8 Dben este trabajo.

En la Figura 5 se muestra la medida del espectro de salida para una separación entre tonos es de 100kHz, en la que se aprecia que tanto los productos de intermodulación de tercer orden (IMD3) como los de quinto orden (IMD5) son mejorados considerablemente comparados con el sistema EER convencional. En concreto, se observan mejoras de aplicar esta técnica de 10.6 dB para el IMD3 y de 4.5 dB para el IMD5 comparadas con la de un sistema EER convencional, lo cual era uno de los objetivos principales de este trabajo. Concretamente, se ha conseguido atenuar a -45dBc los productos de tercer orden y -49dBc los de quinto orden empleado la técnica propuesta en este trabajo, cifras de linealidad que pueden ser equivalentes o incluso superiores a las mostradas por amplificadores de potencia en clase AB convencionales, pero incrementando considerablemente el rendimiento del sistema.

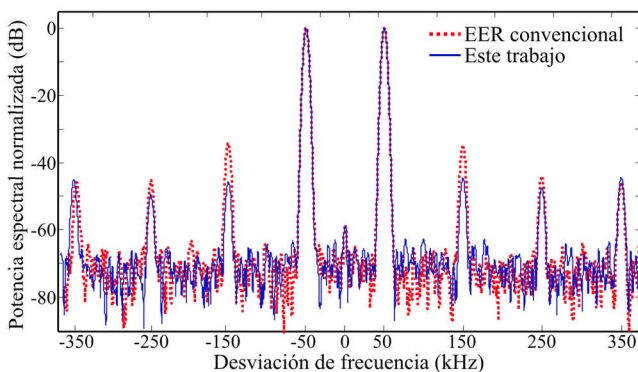


Fig. 5. Espectro medido a la salida del sistema EER para una prueba de dos tonos.

V. CONCLUSIONES

Este trabajo muestra el resultado de la aplicación de una nueva técnica de modulación de excitación en un amplificador EER de alto rendimiento. El sistema comprende un amplificador de RF de banda ancha basado en transistores GaN HEMT con la peculiaridad de que trabaja en modo mixto (clase E subóptimo para niveles de excitación de entrada altos y clase A para niveles de excitación bajos) y por otro lado un modulador basado en un convertidor de potencia reductor de tensión multifase basado en transistores de silicio LDMOS.

A este sistema se le ha aplicado una nueva técnica de modulación de excitación (basada en procesamiento digital de la señal) con el fin de incrementar la G_P del sistema EER, proporcionando niveles de PAE similares a los de los amplificadores EER convencionales pero mejorando significativamente la linealidad del sistema y aumentando el rango dinámico del amplificador con respecto a otras técnicas previas. Además, gracias al empleo de técnicas de predistorsión digital, se han conseguido cifras de linealidad iguales o mejores que las conseguidas por los amplificadores clase AB convencionales para la misma frecuencia y niveles de potencia, pero mejorando significativamente el rendimiento.

En futuros trabajos, se comprobará el correcto funcionamiento de este sistema aplicado a señales actualmente empleadas en los sistemas de comunicaciones inalámbricas actuales, esperando obtener buenos resultados como los obtenidos con la prueba de los dos tonos.

REFERENCIAS

- [1] A. Grebennikov, N. Sokal, M. Franco, *Switchmode RF and Microwave Power Amplifiers*, 2nd Edition, Oxford, UK, Elsevier, 2012.
- [2] Cripps, S. C., "RF Power Amplifiers for Wireless Communications," 2nd Edition, Artech House Publishers, 2006.
- [3] L. R. Kahn, "Single-sideband transmission by envelope elimination and restoration," *Proc. IRE*, vol. 40, no. 7, pp. 803–806, Jul. 1952.
- [4] F. H. Raab, P. Asbeck, S. Cripps, P. B. Kenington, Z. B. Popovic, N. Potheary, J. F. Sevic, and N. O. Sokal, "Power amplifiers and transmitters for RF and microwave," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 50, no. 3, pp. 814–826, Mar. 2002.
- [5] M.P. van der Heijden, H.C. de Graaff, L.C.N.de Vreede, J.R. Gajadharsing, J.N. Burghartz, "Theory and design of an ultra-linear square-law approximated LDMOS power amplifier in class-AB operation", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 50, no. 9, pp. 2176–2184, Sep. 2002.
- [6] F. J. Ortega-Gonzalez, D. Tena-Ramos, M. Patiño-Gomez, J. M. Pardo-Martin, D. Madueño-Pulido, "High-Power Wideband L-Band Suboptimum Class E Power Amplifier", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 61, no. 10, pp. 3712–3720, Sept. 2013.
- [7] J. Sebastian, P. Fernandez-Miaja, F. J. Ortega-Gonzalez, M. Patiño, M. Rodriguez, "Design of Two-Phase Buck Converter With Fourth-Order Output Filter for Envelope Amplifier of Limited Bandwidth", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, pp. 5933–5948, Nov 2014.
- [8] F. H. Raab, "Drive modulation in Kahn-technique transmitters," *Int. Microwave Symp. Digest*, Anaheim, CA, vol. 2, pp. 811–814, June 14–17, 1999.
- [9] J. C. Pedro, J. A. García, and P. M. Cabral, "Nonlinear Distortion Analysis of Polar Transmitters," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, Vol. 55, No. 12, pp. 2757 - 2765 Dec. 2007.
- [10] N. Wang, X. Peng, V. Yousefzadeh, D. Maksimovic, S. Pajic, Z. Popovic, "Linearity of X-band class-E power amplifiers in EER operation", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 53, no. 3, pp. 1096–1102, March 2005.